

# بررسی عملکرد جذب خط انتقال ریزموج چاپ شده به روش جوهرافشانی در باند S

محمد مؤمنی نسب، سیدمنصور بیدکی، محسن هادی زاده و مسعود موحدی

صفحه رسانا و خط ریزنواری هستند [۱] و [۲].

در روش مرسوم ساخت خطوط انتقال ریزموج و آنتن‌های ریزنواری، خط انتقال یا آنتن [۳] تا [۷] از جنس فلز بوده و به صورت کاشی و با استفاده از فناوری لیتوگرافی نوری ساخته می‌شود که معمولاً گران و زمان‌بر بوده و دارای ضایعات شیمیایی است. یکی از روش‌های نوین برای ساخت خط انتقال ریزموج که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری بوده، روش چاپ جوهرافشان است. روش چاپ جوهرافشان، فرایندی افزایشی، غیر تماسی، دارای دمای کاری پایین، سریع و سازگار با محیط است که نیازی به ماسک‌گذاری ندارد [۸]. این روش نوین چاپ برای ساخت مسیرهای رسانا و خطوط انتقال با استفاده از جوهر نانوذرات فلزی به ویژه نقره بر سطح زیرلایه‌های مختلف [۹] تا [۱۶] به کار رفته است.

تا کنون هیچ گزارشی درباره چاپ جوهرافشانی خطوط انتقال ریزموج با استفاده از جوهرهای واکنشی ارائه نشده است. جوهرهای واکنشی جوهرهایی هستند که پس از چاپ شدن توسط چاپگر جوهرافشان بر روی زیرلایه با یکدیگر واکنش داده و محصول مورد نظر را ایجاد می‌نمایند. جوهرهای واکنشی جهت ایجاد طرح‌های فلزی بر روی زیرلایه‌های مختلف با به کارگیری محلول‌های نمک فلزی و عامل کاهنده شیمیایی استفاده شده‌اند [۸] و [۱۷] تا [۱۹]. پس می‌توان خطوط انتقال ریزموج را با استفاده از جوهرهای واکنش‌دهنده تولید کرد. جوهرهای واکنش‌دهنده نسبت به جوهر نانوذرات نقره از برتری‌های مهمی چون هزینه کمتر، پایداری بالاتر، در دسترس بودن، امکان چاپ آنها با هدهای جوهرافشان معمولی (گرمایی)، قابلیت تنظیم خواص لایه فلزی تولیدی با تغییر تعداد دفعات چاپ جوهر و یا استفاده از جوهر با غلظت‌های متفاوت، برخوردار است. شایان یادآوری است که جوهر نانوذرات نقره می‌تواند اکسید شود و جهت جلوگیری از اکسایش نیاز به عملیات پایداری سطح زیرلایه دارد و همچنین جوهر نانوذرات نقره گران بوده و برای تولید انبوه مقرون‌به‌صرفه نیست [۲۰].

پژوهش حاضر نخستین تلاش برای معرفی جوهرهای واکنش‌دهنده به عنوان جایگزین کم‌هزینه و قابل اطمینان فلزات (از جمله مس) و جوهرهای حاوی نانوذرات نقره جهت تولید ساختارهای انتقال ریزموج و مسیرهای رسانا است. با به کارگیری جوهرهای واکنش‌دهنده بر پایه آب و روش چاپ جوهرافشان، خطوط انتقال ریزموج بر روی زیرلایه  $RO4003C$  چاپ شدند و همچنین اتصال فلز به ماده چاپی انجام گرفت. ساختار انتقال ریزموج تهیه شده بر پایه خط‌های ریزنواری، نرخ جذب تقریباً ثابتی در گستره فرکانس ۴-۲ GHz (باند S) را نشان داد.

## ۲- مواد و تجهیزات

در این پژوهش، از آسکوربیک اسید و نقره نیترات به ترتیب برای تهیه

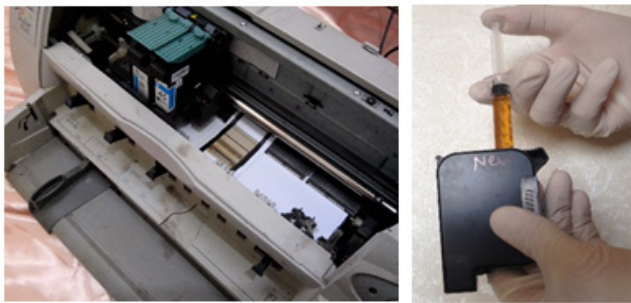
چکیده: فناوری چاپ جوهرافشان یکی از نویدبخش‌ترین روش‌های چاپ است که ساخت الگوهای رسانا را در یک مرحله و به طور مستقیم امکان‌پذیر کرده است. در این پژوهش با به کارگیری جوهرهای واکنش‌دهنده بر پایه آب و روش چاپ جوهرافشان، خط انتقال ریزموج بر روی زیرلایه راجرز  $RO4003C$  ساخته شد. ساختار انتقال ریزموج ساخته شده شامل خط نقره‌ای چاپ شده به روش جوهرافشان، لایه دی‌الکتریک و صفحه فلزی زمین است. میزان رسانایی خط چاپ شده به روش چهار الکتروود تماسی اندازه‌گیری شد. نرخ جذب امواج الکترومغناطیسی خط انتقال چاپ شده با توجه به میزان رسانایی محاسبه شده، با نرم‌افزار شبیه‌ساز ساختارهای فرکانس بالا، شبیه‌سازی گردید که هم‌خوانی بسیار خوبی را با نرخ جذب اندازه‌گیری شده در گستره فرکانس ۴-۲ GHz (باند S) دارد.

کلیدواژه: خط انتقال، چاپ جوهرافشان، جوهرهای واکنشی، نانو ذرات نقره، ریزموج.

## ۱- مقدمه

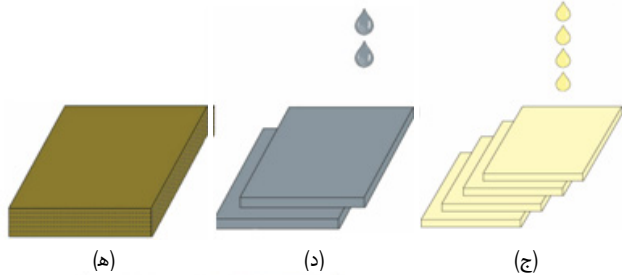
در یک سامانه الکترونیکی، انتقال توان نیازمند اتصال دو سیم میان منبع و مصرف‌کننده است. در فرکانس‌های پایین، توان خواسته شده از طریق سیم به مصرف‌کننده انتقال داده می‌شود اما در گستره فرکانس ریزموج، توان خواسته شده در فرم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هست که از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر توسط برخی ساختارهای فیزیکی هدایت می‌شوند. هر ساختار فیزیکی که موج‌های الکترومغناطیسی را هدایت کند، خط انتقال نامیده می‌شود. در واقع خط انتقال، مداری با دو پورت (یک خروجی و یک ورودی) است که برای اتصال به مولد یا فرستنده سیگنال به مصرف‌کننده در یک فاصله معین استفاده می‌شود. خط‌های انتقال توزیع توان، در فرکانس‌های پایین و خط‌های انتقال امواج الکترومغناطیسی، در فرکانس‌های بالا به کار می‌روند. خطوط انتقال شامل کابل‌های هم‌محور، خط دو سیم، خط صفحات مسطح موازی، سیم بالای

این مقاله در تاریخ ۱۱ شهریور ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۲۴ اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ بازنگاری شد.  
محمد مؤمنی نسب، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: m.momeni78@gmail.com).  
سیدمنصور بیدکی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: smbido@yazd.ac.ir).  
محسن هادی زاده، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: hadizadeh@yazd.ac.ir).  
مسعود موحدی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: movahhedi@yazd.ac.ir).



(ب)

(الف)



(ه)

(د)

(ج)



(ز)

(و)

شکل ۱: (الف) پُر کردن کارت‌تریچ چاپگر جوهرافشان، (ب) قراردادن کارت‌تریچ حاوی جوهر آسکوربیک اسید در چاپگر، (ج) چاپ جوهرافشانی جوهر آسکوربیک اسید، (د) چاپ جوهرافشانی جوهر نقره نیترات، (ه) استحصال نانوذرات نقره در اثر واکنش عامل کاهنده با نمک فلزی، (و) حرارت‌دهی نانوذرات نقره استحصال‌یافته و (ز) طرح‌های نقره‌ای استحصال‌شده.

که  $C_6H_8O_6$  محلول آسکوربیک اسید (A)، NaOH محلول هیدروکسید سدیم،  $AgNO_3$  محلول نقره نیترات (G)،  $Ag(s)$  نقره استحصال‌یافته،  $C_6H_8O_6$  دی‌هیدرو آسکوربیک اسید و  $NaNO_3$  سدیم نیترات است.

ویژگی جوهرهای آماده‌شده در جدول ۲ قابل مشاهده هستند.

### ۲-۳ روش انجام آزمایش‌ها

در فرایند چاپ جوهرافشانی ساختار انتقال ریزموج، نخست جوهر محتوی کارت‌تریچ چاپگر جوهرافشان تخلیه گردید و درون کارت‌تریچ با آب مقطر شسته شد. به علت واکنش میان دو محلول عامل کاهنده و نمک فلزی و جهت جلوگیری از گرفتگی نازل‌های ریز کارت‌تریچ، هر کدام از محلول‌ها یعنی آسکوربیک اسید و نقره نیترات در یک کارت‌تریچ جدا قرار گرفت (شکل ۱-الف) و در چاپ جوهرافشانی طرح‌های الکتریکی استفاده شدند [۱۷]. برای چاپ ساختار انتقال ریزموج‌ها، نخست کارت‌تریچ محتوی آسکوربیک اسید داخل چاپگر قرار گرفت (شکل ۱-ب) و با توجه به تعداد مراحل چاپ بهینه AAAAG [۱۸]، A نشانه چاپ یک مرحله عامل کاهنده و G نشانه چاپ یک مرحله نمک فلزی است، چهار بار پی‌درپی محلول آسکوربیک اسید چاپ شد (شکل ۱-ج) و در مرحله بعد کارت‌تریچ

جدول ۱: مشخصات دی‌الکتریک زیرلایه RO4003C.

| نوع زیرلایه          | ضخامت (μm) | ثابت دی‌الکتریک | توازنات تلفات |
|----------------------|------------|-----------------|---------------|
| صفحه راجرز (RO4003C) | ۲۰۳        | ۳٫۵۵            | ۰٫۰۰۲۴ / [۲۲] |

جدول ۲: ویژگی جوهرها [۱۷].

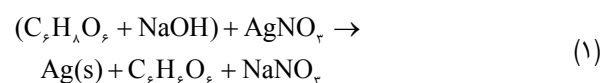
| نوع جوهر            | مواد جامد (%) | pH  | چگالی (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------------|---------------|-----|----------------------------|
| محلول آسکوربیک اسید | ۲۳            | ۵٫۵ | ۱٫۱۰                       |
| محلول نقره نیترات   | ۴۴            | ۳٫۵ | ۱٫۵۱                       |

محلول‌های عامل کاهنده و نمک فلزی استفاده شد. محلول‌های آسکوربیک اسید و نقره نیترات با به کارگیری آب مقطر، به ترتیب با غلظت‌های وزنی ۳۰٪ و ۵۰/۲۵٪ آماده شدند. برای انجام عملیات چاپ ساختارهای انتقال ریزموج، رایانه مجهز به نرم‌افزار Microsoft office چاپگر جوهرافشان گرمایی hp مدل Deskjet ۱۲۲۰C دارای وضوح تصویر ۶۰۰×۶۰۰ dpi، بیشترین ضخامت زیرلایه قابل چاپ ۳۰۰۰ μm و کارت‌تریچ مشکی ۴۵A بهره گرفته شد. صفحه راجرز (RO4003C) به عنوان زیرلایه برای چاپ خطوط انتقال ریزموج به کار رفت. جدول ۱ مشخصات دی‌الکتریکی زیرلایه RO4003C را نشان می‌دهد. جهت بررسی نرخ جذب امواج الکترومغناطیسی خط انتقال چاپ‌شده، دستگاه «تحلیل‌گر شبکه برداری (VNA)» به کار رفت. برای اندازه‌گیری میزان رسانایی خطوط چاپی از دستگاه «چهار الکتروود تماسی<sup>۱</sup>»، منبع تغذیه DC و مولتی‌متر استفاده شد. نرم‌افزار «شبیه‌ساز ساختارهای فرکانس بالا<sup>۲</sup> (HFSS)» [۲۱] در شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. برای اندازه‌گیری پهنای خطوط چاپی از میکروسکوپ نوری استفاده شد. «میکروسکوپ الکترونی روبشی- گسیل میدانی<sup>۴</sup> (FE-SEM)» جهت بررسی مورفولوژی لایه نقره‌ای تشکیل‌شده بر سطح زیرلایه به کار رفت.

### ۳- تجربیات

#### ۳-۱ آماده‌سازی جوهرها

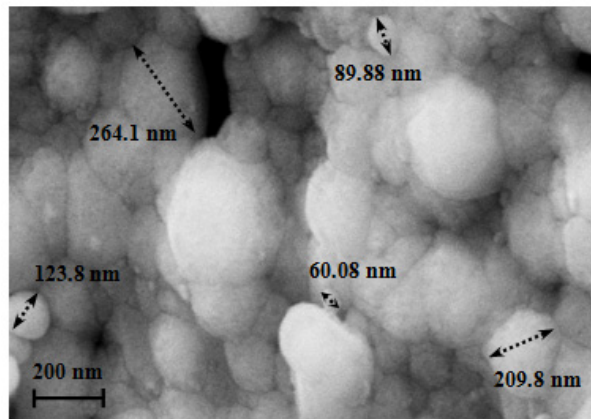
در فرایند چاپ، دو جوهر واکنش‌دهنده آسکوربیک اسید و نقره نیترات به ترتیب به عنوان عامل کاهنده و نمک فلزی به کار رفتند تا از واکنش آن دو (رابطه (۱)) پس از چاپ‌شدن به صورت انفرادی و پی‌درپی بر سطح زیرلایه، ذرات نقره فلزی استحصال شود. برای آماده‌سازی محلول‌های آسکوربیک اسید و نقره نیترات به ترتیب با درصدهای وزن به حجم (w/v) ۳۰٪ و ۵۰/۲۵٪ از آب مقطر به عنوان حلال استفاده شد. غلظت‌های یادشده بر پایه آزمایش و دستاورد پژوهشگرهای پیشین با توجه به میزان رسانایی بهینه ماده چاپی [۱۸] انتخاب شدند. محلول هیدروکسید سدیم (۳۵ w/v٪) برای انحلال بهتر آسکوربیک اسید در آب و تنظیم pH محلول در ۵٫۵ استفاده گردید. pH محلول نقره نیترات در مقدار اولیه‌اش ۳٫۵ نگه داشته شد



1. Vector Network Analyzer
2. Four Point Probe
3. High Frequency Structure Simulator
4. Field Emission-Scanning Electron Microscopy

### ۳-۳ چاپ جوهرافشانی خط انتقال ریزموج بر روی زیرلایه راجرز

به منظور تهیه یک ساختار خطی انتقال دهنده ریزموج از جنس نانوذرات نقره‌ای استحصال شده به روش جوهرافشانی، یک خط با پهنای ۱٫۷ mm و طول ۳۴ mm در نرم افزار word طراحی شد تا سپس در بین دو مستطیل کوچک که از قبل بر سطح صفحه مسی بالایی راجرز به روش انحلال انتخابی<sup>۱</sup> ایجاد شده بود مورد استحصال شیمیایی نقره قرار گیرد. دو مستطیل کوچک از جنس مس به پهنای ۱٫۵ mm و طول ۸ mm بوده که نقش اتصال دهنده‌های دو طرف خط چاپی نقره‌ای به دستگاه‌های اندازه‌گیری را دارند. زیرلایه راجرز حاوی مستطیل‌های مسی با استفاده از چسب نواری به کاغذ A۴ چسبانده شد (شکل ۳-الف) و سپس الگوی طراحی شده با چاپ جوهرافشانی پی‌درپی محلول‌های آسکوربیک اسید و نقره نیترات از جنس نقره فلزی بر روی زیرلایه راجرز تهیه گردید (شکل ۳-ب).



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی-گسیل میدانی (FE-SEM) نانوذرات نقره استحصال یافته بر زیرلایه پس از عملیات حرارت‌دهی.

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱ اندازه‌گیری میزان رسانایی الکتریکی خط‌های چاپ شده بر روی زیرلایه راجرز

جهت بررسی میزان رسانایی الکتریکی خط‌های چاپ شده بر روی زیرلایه راجرز، دستگاه «چهار الکتروود تماسی»، منبع تغذیه مستقیم و دو مولتی‌متر طبق مدار شکل ۴-الف به یکدیگر متصل شدند که نمای الکتریکی مدار بسته شده در شکل ۴-ب قابل مشاهده است. در انجام این آزمون، ولتاژ و جریان الکتریکی منبع تغذیه به ترتیب روی ۳۷ و ۲۰۰ mA تنظیم شد.

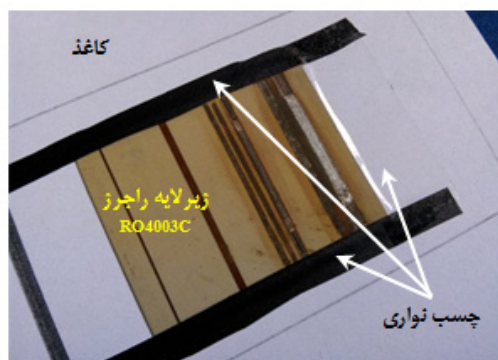
ابتدا دستگاه «چهار الکتروود تماسی» روی خط چاپ شده نقره‌ای قرار گرفت و برای تماس بهتر با خط چاپی وزنه‌ای با وزن ۵۰۰ g بر روی دستگاه «چهار الکتروود تماسی» قرار داده شد. سپس عددهای جریان و ولتاژ مولتی‌مترهای متصل به دو الکتروود خارجی و دو الکتروود داخلی دستگاه «چهار الکتروود تماسی» خوانده شد و برای به دست آوردن میزان رسانایی خط‌های چاپی از [۲۳] استفاده گردید

$$\rho = R \frac{A}{l} \rightarrow \rho = R \frac{tw}{l} (\Omega m) \rightarrow \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{l}{Rtw} = \frac{Il}{Vtw} (S/m)$$

در معادله یادشده،  $R$  مقاومت الکتریکی خط چاپی بر حسب اهم ( $\Omega$ )،  $\rho$  مقاومت ویژه خط چاپی بر حسب اهم‌متر ( $\Omega m$ )،  $l$  طولی از خط چاپ شده تحت آزمون رسانایی بر حسب متر ( $m$ )،  $A$  سطح مقطع خط چاپی بر حسب مترمربع ( $m^2$ ) که برابر است با  $t \times w$ ،  $t$  ضخامت خط چاپی بر حسب متر ( $m$ )،  $w$  پهنای خط چاپی بر حسب متر ( $m$ )،  $V$  ولتاژ خوانده شده میان دو الکتروود داخلی دستگاه «چهار الکتروود تماسی» بر حسب ولت ( $V$ )،  $I$  شدت جریان عبوری از خط چاپی بر حسب آمپر ( $A$ ) و  $\sigma$  رسانایی الکتریکی خط چاپی بر حسب یک بر اهم‌متر ( $1/\Omega m$ ) یا زیمنس بر متر ( $S/m$ ) است.

در محاسبه میزان رسانایی خط چاپ شده (جدول ۳)،  $l$  طولی از خط چاپ شده که برابر با فاصله میان دو الکتروود داخلی دستگاه «چهار الکتروود



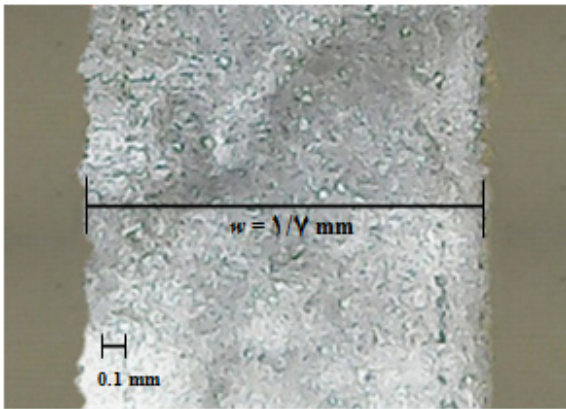
(الف)



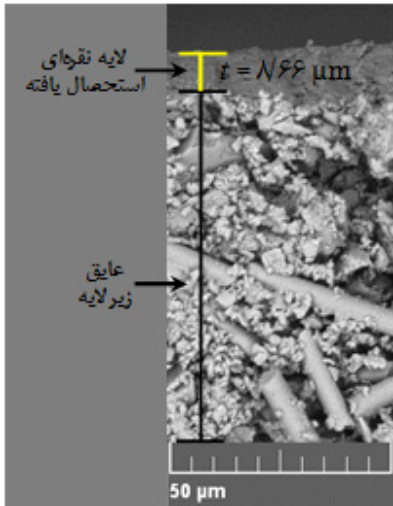
(ب)

شکل ۳: (الف) ثابت کردن زیرلایه راجرز با چسب نواری به کاغذ و (ب) چاپ جوهرافشان خط انتقال ریزموج بر سطح زیرلایه راجرز.

محتوی نقره نیترات داخل چاپگر قرار گرفت و دو بار پی‌درپی محلول نقره نیترات چاپ گردید (شکل ۱-د). در هر مرحله از چاپ جوهرها (یعنی چهار بار محلول آسکوربیک اسید و دو بار محلول نقره نیترات) بستر مورد چاپ به گونه‌ای به چاپگر تغذیه شده است که جابه‌جایی آن به سمت عقب یا جلو و به سمت چپ یا راست تحت کنترل بوده است تا طرح دقیقاً در محل مشخص شده و با همپوشانی تقریباً کامل بر سطح چاپ شده قبلی قرار گیرد. با این کار، محلول نقره نیترات با محلول آسکوربیک اسید واکنش داده و لایه‌ای از ذرات نقره بر سطح زیرلایه استحصال می‌گردد (شکل ۱-ه). به منظور افزایش میزان واکنش بین دو جوهر شیمیایی و تشکیل لایه‌ای یکدست از ذرات نقره، الگوهای چاپ شده در زیر یک پرس حرارتی با دمای  $200^\circ C$  به مدت ۲۰ sec قرار گرفتند (شکل ۱-و). شکل ۱-ز طرح‌های نقره‌ای استحصال شده نهایی به روش چاپ جوهرافشانی جوهرهای واکنش دهنده را نشان می‌دهد. شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی-گسیل میدانی نانوذرات نقره استحصال یافته به روش جوهرافشانی یادشده با قطر تقریبی ۶۰-۲۷۰ nm را نشان می‌دهد. در پایان، آزمون‌های ارزیابی ویژگی‌های الکتریکی دلخواه بر روی الگوهای چاپ شده انجام شد.

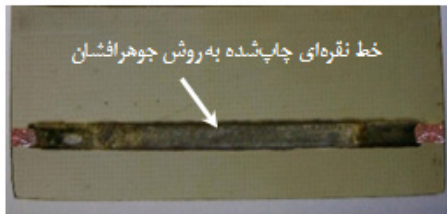


(الف)

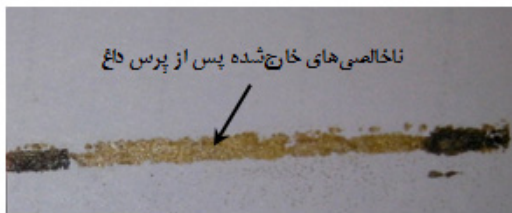


(ب)

شکل ۵: (الف) پهنای خط چاپ شده (تصویر میکروسکوپ نوری) و (ب) ضخامت ماده چاپ شده (تصویر FE-SEM) بر روی صفحه راجرز.



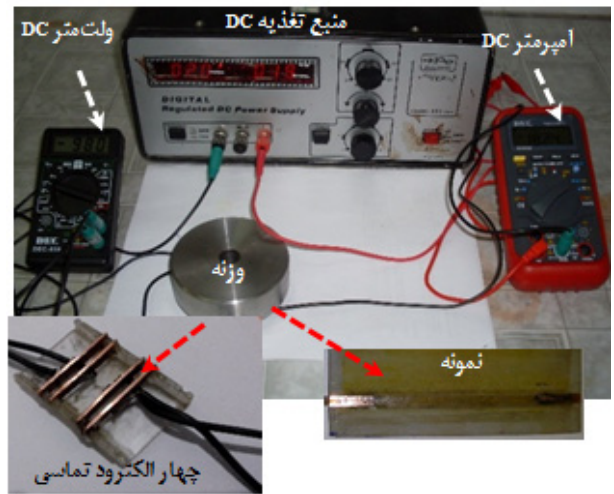
(الف)



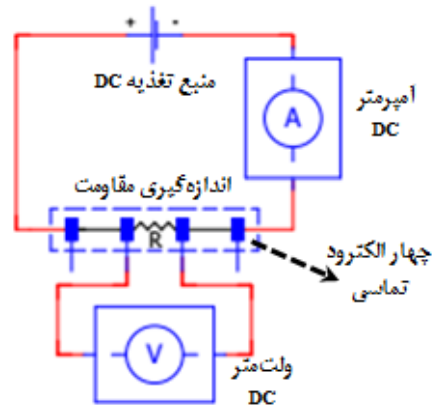
(ب)

شکل ۶: (الف) خط چاپی به روش جوهرافشان و (ب) خارج شدن ناخالصی‌های ماده چاپی پس از اتوی داغ.

در ماده چاپی تحت حرارت و در تماس با یک لایه کاغذی فشرده شده بر سطح خط‌های چاپ شده تا اندازه‌ای خارج گردید (شکل ۶-ب) و رسانایی ماده چاپ شده افزایش یافت. دی‌هیدروآسکوربیک اسید و سدیم نیترات ناخالصی‌های خط چاپی یا فرآورده‌های فرعی واکنش اُکسایش بین محلول‌های آسکوربیک اسید و نقره نیترات (فرمول (۱)) هستند که هر دو در آب قابل حل بوده و از سطح ذرات استحصالی قابل شستشو می‌باشند [۱۸]. همچنین دی‌هیدروآسکوربیک اسید و سدیم نیترات بر اثر پرس داغ



(الف)



(ب)

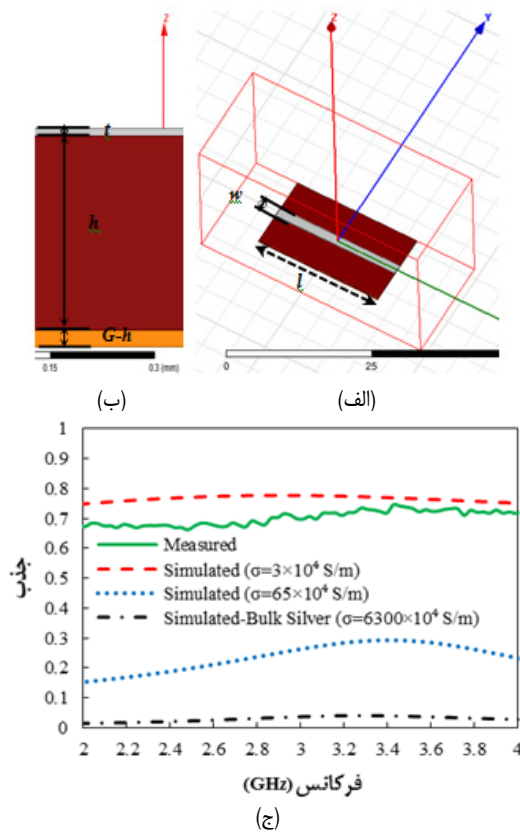
شکل ۴: (الف) تصویر اجزای مدار اندازه‌گیری میزان رسانایی خط‌های چاپ شده و ثابت کردن زیرلایه راجرز با چسب نواری به کاغذ و (ب) نمای الکتریکی مدار بسته شده جهت انجام آزمون رسانایی.

جدول ۳: میزان رسانایی خط‌های انتقال چاپ شده با پهنای ۱/۷ MM بر روی زیرلایه راجرز.

| نمونه   | پهنای خط چاپی (mm) | ولتاژ اندازه‌گیری شده (V) | جریان اندازه‌گیری شده (mA) | مقاومت الکتریکی (Ω) | میزان رسانایی (S/m) |
|---------|--------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| ۱       | ۱,۶۹۳              | ۱,۵۱                      | ۵۷                         | ۲۶,۵                | ۳۱,۰۶۶              |
| ۲       | ۱,۷۱۰              | ۱,۶۶                      | ۶۲                         | ۲۶,۸                | ۳۰,۴۱۳              |
| ۳       | ۱,۷۰۴              | ۱,۵۴                      | ۵۵                         | ۲۸                  | ۲۹,۲۱۲              |
| ۴       | ۱,۶۹۰              | ۱,۴۷                      | ۵۳                         | ۲۷,۷                | ۲۹,۷۷۳              |
| ۵       | ۱,۷۰۱              | ۱,۶۳                      | ۵۹                         | ۲۷,۶                | ۲۹,۶۸۷              |
| میانگین | ۱,۷۰۰              | -                         | -                          | ۲۷,۳۲               | ۳۰,۰۳۰              |
| CV%     | ۰,۴۸               | -                         | -                          | ۲,۳۴                | ۲,۴۰                |

تماسی» و مساوی ۱۱/۱۵ mm است و  $w$  پهنای خط‌های چاپ شده که به وسیله میکروسکوپ نوری به دست آمده و به طور میانگین برابر ۱/۷ mm (شکل ۵-الف) است و  $t$  ضخامت لایه نقره‌ای تشکیل شده بر سطح زیرلایه به صورت خط چاپ شده است که به وسیله میکروسکوپ الکترونی- گسیل میدانی به دست آمده و به طور میانگین برابر  $۸,۶۶ \mu m$  (شکل ۵-ب) است.

خط‌های انتقال چاپ شده (شکل ۶-الف) دارای رسانایی الکتریکی پایینی بودند و جهت بهبود میزان رسانایی با به کارگیری اتوی پرس تحت حرارت غیر مستقیم قرار گرفتند، به این روش ناخالصی‌های موجود



شکل ۹: شبیه‌سازی خط انتقال چاپ‌شده در نرم‌افزار HFSS، (الف) نمای سه‌بعدی، (ب) نمای مقطع عرضی و (ج) نرخ جذب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی.

در معادلات نام‌برده،  $S_{11}$  (dB) ضریب بازتاب موج،  $S_{21}$  (dB) ضریب انتقال موج،  $A$  ( $\omega$ ) نرخ جذب موج،  $R$  ( $\omega$ ) مقدار بازتاب موج و  $T$  ( $\omega$ ) مقدار انتقال موج است.

نرم‌افزار «شبیه‌ساز ساختارهای فرکانس بالا» جهت شبیه‌سازی خط انتقال چاپ‌شده به روش جوهرافشانی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۹-الف و ۹-ب). در شبیه‌سازی خط انتقال چاپ‌شده، پارامترهای میزان رسانایی اندازه‌گیری شده به روش DC ( $\sigma = 30.30 \text{ S/m}$ )، پهنای خط چاپی ( $w = 1.7 \text{ mm}$ )، طول خط چاپی ( $l = 24 \text{ mm}$ )، ضخامت ماده چاپی ( $t = 8.66 \mu\text{m}$ )، مشخصات الکترومغناطیس زیرلایه RO4003C ( $\tan \delta = 0.0024$  و  $\epsilon_r = 3.55$ ) ( $h = 2.3 \mu\text{m}$ ) و ضخامت صفحه مسی زمین ( $G-h = 17.5 \mu\text{m}$ ) لحاظ شدند. شکل ۹-ج نمودارهای نرخ جذب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی خط انتقال چاپ‌شده به روش جوهرافشانی در باند S (گستره فرکانس ۲-۴ GHz) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹-ج می‌توان ملاحظه کرد که هم‌خوانی بسیار خوبی میان نمودارهای نرخ جذب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (با میزان رسانایی  $\sigma = 3 \times 10^4 \text{ S/m}$ ) وجود دارد به گونه‌ای که درصد خطا بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ۶/۲۲٪ است.

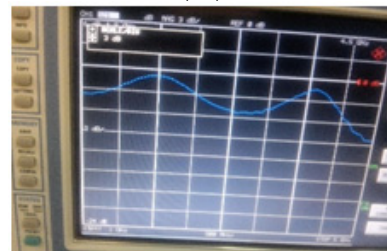
با توجه به قابل تغییر بودن میزان هدایت الکتریکی لایه نقره‌ای تشکیل‌شده بر سطح زیرلایه، با تغییر تعداد دفعات و ترتیب چاپ جوهرافشانی جوهرهای واکنش‌دهنده بر سطح زیرلایه، بالاترین مقدار هدایت الکتریکی مشاهده‌شده از خط‌های نقره‌ای چاپ‌شده به روش جوهرافشانی بر زیرلایه‌های دیگر در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد شد تا اثر احتمالی افزایش هدایت الکتریکی لایه نقره‌ای بر رفتار جذب خط انتقال مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور نمودار شبیه‌سازی با میزان رسانایی  $\sigma = 65 \times 10^4 \text{ S/m}$  (شکل ۹-ج) که در آزمون‌های پیشین مورد استحصال بر لایه‌های کاغذی قرار گرفته بود در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد



شکل ۷: تصویری از لحیم‌کاری اتصال دهنده هم‌محور به پشت و روی زیرلایه راجرز.



(الف)



(ب)

شکل ۸: (الف) تابش موج به خط انتقال چاپ‌شده و (ب) نمونه‌ای از پارامتر S اندازه‌گیری شده.

غیر مستقیم با دمای  $200^\circ\text{C}$  و به مدت ۲۰ sec، قابل کاستن هستند (شکل ۶-ب).

میزان رسانایی خط‌های انتقال چاپ‌شده بر روی زیرلایه راجرز پس از حرارت‌دهی به طور میانگین  $30.30 \text{ S/m}$  به دست آمد (جدول ۳).

### ۲-۴ بررسی نرخ جذب خط انتقال چاپ‌شده به روش جوهرافشانی

به منظور اندازه‌گیری نرخ جذب خط انتقال ریزموج، «اتصال‌دهنده‌های هم‌محور»<sup>۱</sup> به مستطیل‌های مسی و صفحه زمین لحیم‌کاری شدند (شکل ۷).

شکل ۸-الف تابش موج به خط انتقال چاپ‌شده به وسیله دستگاه «تحلیل‌گر شبکه بُرداری» را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از پارامتر S (dB) اندازه‌گیری شده در شکل ۸-ب قابل مشاهده است.

با توجه به نمودارهای ضریب بازتاب موج ( $S_{11}$  (dB) و ضریب انتقال موج ( $S_{21}$  (dB) استخراج‌شده از دستگاه تحلیل‌گر شبکه بُرداری و (۳)، اعداد  $S$  (dB) به اندازه یا بزرگی<sup>۲</sup> تبدیل شدند و با به کارگیری (۴)، میزان اتلاف موج در خط انتقال چاپ‌شده محاسبه شد

$$20 \log_{10} |S| = S(\text{dB}) \rightarrow |S| = 10^{(S(\text{dB})/20)} \quad (3)$$

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (4)$$

1. SMA Connector  
2. Magnitude

*IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 178-181, Feb. 2013.

[۷] ع. حیدری، "طراحی و ساخت آنتن ریزنواری با پلاریزاسیون دایره‌ای با قابلیت بهبود SWR ورودی برای کاربرد GPS"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۸۶.

- [8] S. M. Bidoki, D. McGorman, D. M. Lewis, M. Clark, G. Horler, and R. E. Miles, "Inkjet printing of conductive patterns on textile fabrics," *AATCC Review*, vol. 5, no. 6, pp. 11-14, Jun. 2005.
- [9] H. L. Kao, C. H. Chuang, L. C. Chang, C. L. Cho, and H. C. Chiu, "Inkjet-printed silver films on textiles for wearable electronics applications," *Surface and Coatings Technology*, vol. 362, no. 4, pp. 328-332, Mar. 2019.
- [10] B. Huber, J. Schober, M. Kaiser, A. Ruediger, and C. Schindler, "Rotate-to-bend setup for fatigue bending tests on inkjet-printed silver lines," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 3, no. 3, Article No. 035005, 7 pp., Aug. 2018.
- [11] S. M. Sim, et al., "RF performance of ink-jet printed microstrip lines on rigid and flexible substrates," *Microelectronic Engineering*, vol. 168, no. 1, pp. 82-88, Jan. 2017.
- [12] S. M. Sim, Y. Lee, H. L. Kang, K. Y. Shin, S. H. Lee, and J. M. Kim, "Transmission line printed using silver nanoparticle ink on FR-4 and polyimide substrates," *Micro and Nano Systems Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 1-6, Dec. 2016.
- [13] J. Wang, S. Lam, and E. G. Lim, "RF performance evaluation of microstrip lines printed on flexible polyethylene terephthalate (PET) films," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, IMWS-AMP'15*, vol. 3 pp., Suzhou, China, 1-3 Jul. 2015.
- [14] F. Mohtaram, V. Mottaghtalab, G. Baghersalimi, and A. K. Haghi, "The development of textile based microstrip antenna using inkjet printing," *J. of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, vol. 33, no. 3, pp. 61-78, Mar. 2015.
- [15] V. Camarchia, et al., "Demonstration of inkjet-printed silver nanoparticle microstrip lines on alumina for RF power modules," *Organic Electronics*, vol. 15, no. 1, pp. 91-98, Jan. 2014.
- [16] M. M. Belhaj, et al., "Inkjet printed flexible transmission lines for high frequency applications up to 67 GHz," in *Proc. 44th European Microwave Conf.*, pp. 1528-1531, Rome, Italy, 6-7 Oct. 2014.
- [17] M. Momeni Nasab, S. M. Bidoki, and A. A. Heidari, "Inkjet-fabricated capacitors on paper and textile fabrics," *J. of Textiles and Polymers*, vol. 7, no. 1, pp. 45-52, Jan. 2019.
- [18] S. M. Bidoki, J. Nouri, and A. A. Heidari, "Inkjet deposited circuit components," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 5, Article No. 055023, 7 pp., Apr. 2010.
- [19] S. M. Bidoki, D. M. Lewis, M. Clark, A. Vakorov, P. A. Millner, and D. McGorman, "Ink-jet fabrication of electronic components," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 5, pp. 967-974, Apr. 2007.
- [20] G. Singh, H. Sheokand, K. Chaudhary, K. V. Srivastava, J. Ramkumar, and S. A. Ramakrishna, "Fabrication of a non-wettable wearable textile-based metamaterial microwave absorber," *J. of Physics D: Applied Physics*, vol. 52, no. 38, Article No. 385304, 14 pp., Jul. 2019.
- [21] -, *Simulator High Frequency Structure*, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA, USA, 2012.
- [22] -, *Sheet Rogers RO4003 Laminates Data*, Rogers Corp., Chandler, AZ, USA, 2018.
- [23] J. G. Webster, *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, CRC Press, Jul. 2003.

**محمد مؤمنی نسب** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی نساجی گرایش تکنولوژی نساجی به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۹ از دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه یزد به پایان رسانده است. ایشان تحصیلات خود را در مقطع دکترای مهندسی نساجی گرایش تکنولوژی نساجی از سال ۱۳۹۲ در دانشگاه یزد آغاز نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل چاپ اجزای مدارهای الکتریکی و جذب‌های امواج الکترومغناطیس به روش جوهرافشانی و منسوجات هوشمند است.

**سید منصور بیدکی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی نساجی گرایش شیمی نساجی به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۱ و ۱۳۷۵ از دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است. ایشان در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکترا در رشته مهندسی شیمی رنگ و پلیمر از دانشگاه لیور انگلستان گردید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل چاپ و رنگرزی، شیمی پلیمر، نانوتکنولوژی، منسوجات هوشمند و الکترونیک چاپی است.

شد که کاهش میزان جذب امواج الکترومغناطیس به وسیله خط انتقال در باند S را به دنبال داشت. همان گونه که از شکل ۹-ج مشخص است با نزدیک‌تر شدن میزان رسانایی خط‌های انتقال تهیه‌شده به روش جوهرافشانی به میزان رسانایی نقره خالص، میزان جذب موج، کاهش بسیار زیادی داشته است. نظر به وجود امکان افزایش هدایت لایه تهیه‌شده نقره‌ای به روش جوهرافشانی می‌توان انتظار داشت تا روش چاپ جوهرافشان با جوهرهای واکنشی امکان ساخت خط‌های انتقال با مقادیر جذب موج قابل قبول را به شیوه‌ای ساده و سریع ممکن سازد.

## ۵- نتیجه‌گیری

روش چاپ جوهرافشانی در مقایسه با روش‌های مرسوم ساخت هادی‌ها روشی سریع، کاربرپسند، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط است. در این پژوهش، با استحصال شیمیایی نقره به روش جوهرافشانی بر روی زیرلایه  $RO4003$  خط انتقال ریزموج به طور موفقیت‌آمیزی ساخته شد. ذرات فلزی نقره در اندازه‌های نانومتری از واکنش جوهرهای واکنش‌دهنده حاوی محلول آبی عامل کاهنده (محلول آسکوربیک اسید) و نمک فلزی (محلول نقره نیترات) بر سطح زیرلایه استحصال یافتند. جوهرهای واکنش‌دهنده بر پایه آب به عنوان جایگزین کم‌هزینه و قابل اطمینان جوهرهای حاوی نانوذرات نقره و دیگر فلزات جهت تولید ساختارهای انتقال ریزموج برای نخستین بار معرفی شد. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهند که نرخ جذب خط انتقال چاپ‌شده در باند S (گستره فرکانس ۲-۴ GHz) تقریباً ثابت بوده و از هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری برخوردار است. این هم‌خوانی نرخ جذب، بیانگر صحت اندازه‌گیری میزان رسانایی به دست آمده به روش چهار الکترودماسی (روش DC) و استفاده آن در شبیه‌سازی ساختارهای فرکانس بالاست. افزایش میزان هدایت الکتریکی لایه چاپ‌شده نقره‌ای می‌تواند باعث کاهش میزان تلفات جذبی موج منتقل‌شده از خط انتقال شود. در پژوهش‌های آینده، هدف، بهبود میزان رسانایی ماده چاپی و کاهش میزان اتلاف موج انتقالی در باند ریزموج‌هاست.

## ۶- سپاس‌گزاری

از پژوهشکده مهندسی معدن دانشگاه یزد برای پشتیبانی مالی از این پژوهش، قدردانی می‌شود.

## مراجع

- [1] -, *Microwave Engineering-Transmission Lines*, 2020, (available on [https://www.tutorialspoint.com/microwave\\_engineering/microwave\\_engineering\\_transmission\\_lines.htm](https://www.tutorialspoint.com/microwave_engineering/microwave_engineering_transmission_lines.htm)).
- [2] -, *Transmission Line Theory*, 2020, (available on <http://deltauniv.edu.eg/new/engineering/wp-content/uploads/chap.3.pdf>).
- [3] K. Ramezani-Boldaji, M. Movahhedi, and A. Ghafoorzade-Yazdi, "An ultra wide bandpass filter with wide stop band based on metamaterial structures," *Tabriz J. of Electrical Engineering*, vol. 49, no. 1, pp. 191-199, Apr. 2019.
- [4] F. Fesharaki, T. Djerfaji, M. Chaker, and K. Wu, "Mode-selective transmission line for DC-to-THz super-broadband operation," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp., IMS'16*, 4 pp., San Francisco, CA, USA, 22-27 May 2016.
- [5] M. Alibakhshi-Kenari, M. Naser-Moghadasi, B. S. Virdee, A. Andujar, and J. Anguera, "Compact antenna based on a composite right/left-handed transmission line," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 8, pp. 1785-1788, Aug. 2015.
- [6] J. Naqui, M. Duran-Sindreu, and F. Martin, "Modeling split-ring resonator (SRR) and complementary split-ring resonator (CSRR) loaded transmission lines exhibiting cross-polarization effects,"

**مسعود موحدی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق گرایش مخابرات در سال ۱۳۷۷ در دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده است. ایشان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق گرایش مخابرات میدان به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل روش‌های عددی در الکترومغناطیس، آنتن‌ها و مدارهای غیر فعال میکروویو و فراماده‌ها است.

**محسن هادی‌زاده** تحصیلات خود را در سه مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی نساجی گرایش تکنولوژی نساجی به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۷ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل خواص فیزیکی و مکانیکی پارچه، کنترل کیفیت، مدل‌سازی و روش‌های هوش مصنوعی و مهندسی بافت است.